

دراسة عن تقنيتي الخرسانة ذات المرحلتين وخرسانة "الصخور المملوءة بالخرسانة"

حكيم عبد القادر السموعي وعلي سعيد البادن وألاء الرحمن محمد أبو راوي

قسم الهندسة المدنية، كلية الهندسة، جامعة طرابلس
E-mail: hakimsa@poczta.onet.pl

ABSTRACT

Traditional concrete is one of the building materials used on large scale in the construction of buildings, road projects, infrastructure and various other applications. Given the problems faced by traditional concrete from difficulty of casting, high cost of pouring in some places and applications, in addition to the exposure to shrinkage, honeycombing and other problems. New types of non-traditional concrete were development to overcome the challenges and restrictions on the uses of traditional concrete. Such new types of concrete have been developed and produced in a manner quite different from the traditional concrete in method of mixing, handling and casting. Two-stage concrete (TSC) and Rock filled concrete (RFC) are among these new technologies. For these two technologies, the implementation mechanism is similar. Where in TSC coarse aggregate is placed in the formwork and then injected with mortar to fill in the voids, while in the RFC, rock masses are placed and then the spaces between them are filled in by pouring self-compacting concrete on the surface.

This paper presents a brief summary of these two technologies in terms of implementation mechanism, components, features, places of application and compared with conventional concrete. Because of the lack of references about such modern techniques for concrete in Libya, as well as the absence of executed projects with such techniques, therefore, through-out this paper, an attempt is made to highlight on the TSC and RFC technologies to open the way for the introduction of these two technologies in Libya and take advantage of them from both the academic and the practical prospective.

الملخص

الخرسانة التقليدية هي إحدى مواد البناء المستخدمة على نطاق واسع في تشييد المباني ومشاريع الطرق والبنية التحتية وغيرها من التطبيقات المختلفة. نظراً للمشاكل التي تواجهها الخرسانة التقليدية من صعوبة الصب وارتفاع تكاليف صبها في بعض الأماكن والتطبيقات بالإضافة إلى تعرضها للانكماش والتعشيش وغيرها من المشاكل الأخرى. تم تطوير أنواع جديدة من الخرسانات غير التقليدية في التطبيقات الهندسية للتغلب على التحديات والقيود المفروضة على استخدامات الخرسانة التقليدية ومثل هذه الأنواع الجديدة من الخرسانة تم تطويرها وإنتاجها بطريقة تختلف تماماً عن الخرسانة التقليدية في طريقة الخلط والمناولة والصب. ومنها الخرسانة ذات

المرحلتين "Two-Stage Concrete" (TSC)، وخرسانة "الصخور المملوءة بالخرسانة" "Rock-Filled Concrete" (RFC). لهاتين التقنيتين آلية تنفيذ شبه متماثلة حيث يتم في الخرسانة ذات المرحتين أولاً وضع الركام الخشن في قوالب العمل ومن ثم حقنها بالمونة لمليء الفراغات، أما في تقنية خرسانة "الصخور المملوءة بالخرسانة" فيتم أولاً وضع الكتل الصخرية ومن ثم ملئ الفراغات الموجودة فيما بينهم عن طريق سكب الخرسانة الذاتية الدمك على سطحها.

تعرض هذه الورقة نبذة مختصرة عن هاتين التقنيتين وتتطرق إلى التعريف بهما من حيث آلية التنفيذ والمكونات والميزات وأماكن الاستخدام ومقارنتهما بالخرسانة التقليدية. نظراً لعدم توفر مراجع عن مثل هذه التقنيات الحديثة للخرسانة في ليبيا. ولعدم وجود مشاريع منفذة بمثل هذه التقنيات، لذلك تحاول هذه الورقة تسليط الضوء على تقنيتي الخرسانة ذات المرحتين وخرسانة "الصخور المملوءة بالخرسانة" لفتح المجال أمام إمكانية إدخال هاتين التقنيتين في ليبيا والاستفادة منهما من الناحيتين الأكاديمية والتنفيذية.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة ذات المرحتين؛ خرسانة "الصخور المملوءة بالخرسانة"؛ الخرسانة ذاتية الدمك؛ المونة؛ الركام الخشن.

المقدمة

تعد الخرسانة من أهم مواد البناء الشائعة في تنفيذ المنشآت المختلفة، وهي عبارة عن خليط من مواد أولية مكونة من الأسمنت والماء والركام (الناعم والخشن). بخلط هذه المكونات مع بعضها جيداً تتم عملية تفاعل الأسمنت وينتج عنه حرارة تؤدي إلى تصدق الخرسانة تدريجياً وإكسابها خاصية مقاومة الضغط. وجودة هذه الخرسانة تتأثر بعدة عوامل منها طريقة الخلط والمناولة والصب.

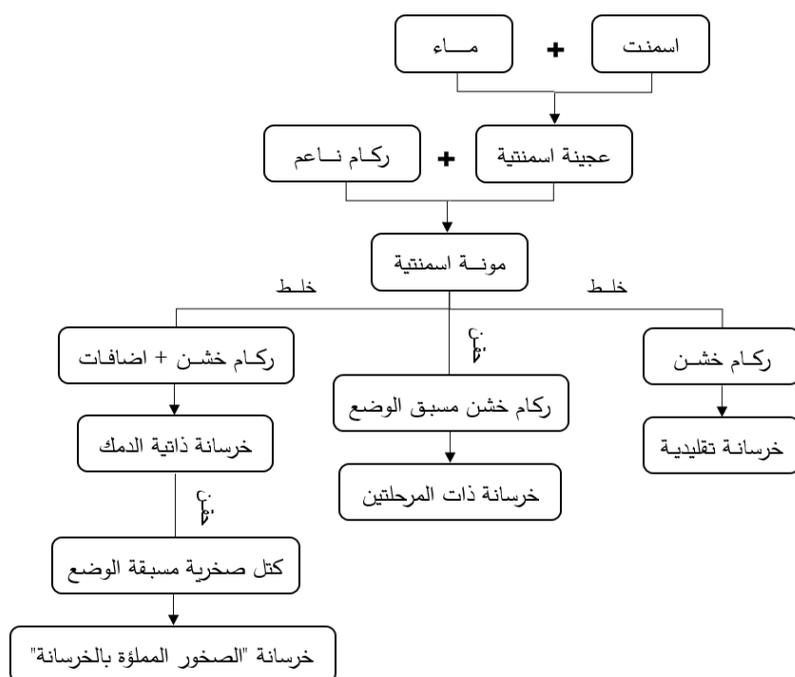
نظراً لوجود بعض القصور والقيود المفروضة على استخدام الخرسانة التقليدية في بعض التطبيقات، فقد يحد ذلك من إمكانية الحصول على خرسانة متجانسة وذات جودة عالية. فعلى سبيل المثال عند صب الخرسانة تحت الماء، تعتبر هذه العملية صعبة وذلك نظراً لإمكانية حدوث انجراف لمكوناتها أثناء الصب مما يؤدي إلى انخفاض جودتها. وللتغلب على هذه المشكلة عادة ما يتم اللجوء إلى إجراءات مكلفة مثل إزاحة الماء واستخدام إضافات لمعالجة مشكلة الانجراف [1].

بالإضافة إلى ذلك، توجد بعض المشاكل الأخرى التي يمكن أن تحدث في الخرسانة التقليدية، كحدوث الانفصال الحبيبي والتعشيش والانكماش وغيرها من المشاكل التي تؤثر على جودة الخرسانة المنتجة. تعتبر ظاهرة الانكماش في الخرسانة التي ينتج عنها تشققات غير مرغوب فيها مصدر قلق متزايد في الأعمال الخرسانية عموماً. ويسهم كل من استخدام نسبة عالية من الإسمنت إلى

الماء (w/c ratio) والتعرض الطويل للظروف القاسية (الحرارة والرطوبة) أثناء الخدمة في زيادة هذه التشققات [1].

لهذه الأسباب المذكورة وغيرها تم تطوير صناعة الخرسانة على نطاق واسع خلال العقود الماضية في سبيل الحصول على خرسانة ذات جودة عالية وبأقل التكاليف وكذلك للتغلب على القيود المفروضة على استخدامات الخرسانة التقليدية. وتختلف تقنيات الخرسانة التي تم تطويرها وإنتاجها تماماً عن الخرسانة التقليدية من حيث طريقة الخلط والمناولة والصب [1].

استناداً إلى تقنية الخرسانة الذاتية الدمك "Self-Compacting Concrete" (SCC)، استحدثت تقنيات جديدة من الخرسانة منها: الخرسانة ذات المرحلتين "Two-Stage Concrete" (TSC)، خرسانة "الصخور المملوءة بالخرسانة" "Rock-Filled Concrete" (RFC). يوضح شكل (1) الفرق في آلية إنتاج الأنواع المختلفة من الخرسانة (الخرسانة التقليدية والخرسانة ذات المرحلتين وخرسانة "الصخور المملوءة بالخرسانة").

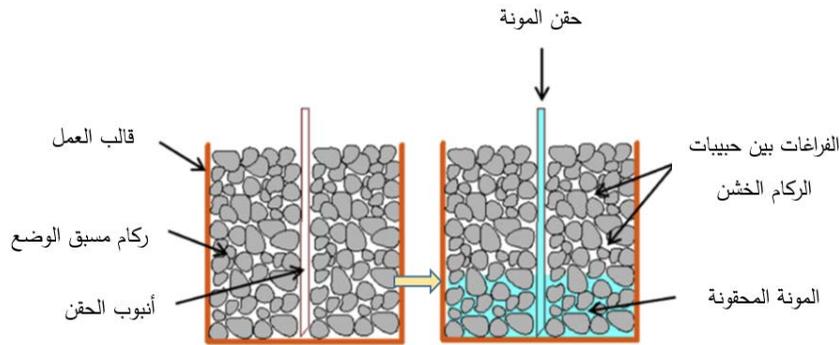


شكل 1: رسم تخطيطي لآلية إنتاج الخرسانات المختلفة.

الخرسانة ذات المرحلتين

تعرف الخرسانة ذات المرحلتين وفقاً للمعهد الأمريكي للخرسانة (Report ACI 116R) بأنها "الخرسانة المنتجة عن طريق وضع الركام الخشن في قالب العمل ومن ثم حقه بمونة الأسمنت

البورتلاندي والرمل وفي العادة تكون مع استخدام إضافات لضمان ملئ الفراغات [2]. يوضح الشكل (2) آلية صب الخرسانة ذات المرحتين. توجد عدة مصطلحات أخرى تصف هذه الطريقة تستخدم دولياً حيث تعكس هذه الأسماء الاختلاف في أساليب الإنتاج [2-3]، من هذه الأسماء: Grouted Aggregate Concrete, Injected Aggregate Concrete, Prepakt Concrete and Colcrete. استخدمت هذه التقنية في العديد من التطبيقات المهمة على مدى السنوات الماضية، ومن أهم هذه التطبيقات، ترميم سد هوفر بأريزونا وإعادة تأهيل سد باركر في كولورادو وبناء ركائز جسر ماكيناك بالولايات المتحدة [2]. وتستخدم الخرسانة ذات المرحتين عند وجود صعوبة في صب الخرسانة التقليدية على سبيل المثال عند صب المقاطع الخرسانية ذات الكثافة العالية من حديد التسليح. كما أنها مفيدة بشكل خاص في صب وترميم الخرسانة تحت الماء والخرسانة الثقيلة الوزن. وبصفة عامة تستخدم في التطبيقات التي تحتاج إلى خرسانة ذات تغير حتمي منخفض [2].



شكل 2: آلية صب الخرسانة ذات المرحتين [3].

مكونات تقنية الخرسانة ذات المرحتين

تتكون الخرسانة ذات المرحتين من ركام خشن ومونة خاصة. المونة المستخدمة في الخرسانة ذات المرحتين عادة ما تحتوي على أسمنت بورتلاندي صافي أو مخلوط وركام ناعم جيد التدرج وماء. قدرة المونة على التدفق حول الركام الخشن أمر ضروري لذا عادة ما يتم استخدام إضافات كيميائية لتحسين من قدرتها على التغلغل. تقريباً جميع المواد التي تتوافق مع المواصفات المستخدمة في الخرسانة التقليدية يمكن استخدامها أيضاً في الخرسانة ذات المرحتين.

الركام

كما في الخرسانة التقليدية يتعين على الركام الناعم والخشن أن يتوافق ويتطابق مع المعايير المحددة في المواصفات العالمية مثل المواصفتين الأمريكية والبريطانية

(ASTM C33, BS EN 12620:2013..Etc). حدود التدرج للركام الخشن والناعم الموصي بها لتقنية الخرسانة ذات المرحلتين مدرجة في جدول (1) وجدول (2) على التوالي.

اختيار حجر الركام الخشن له أهمية كبيرة بالنسبة للخرسانة ذات المرحلتين حيث أن خواصها تعتمد بدرجة كبيرة على الخواص الميكانيكية للركام. حيث إن قوة الركام الخشن تؤثر على مقاومة الضغط للخرسانة ذات المرحلتين بدرجة أكبر مقارنة بتأثيرها في الخرسانة التقليدية وذلك بسبب تركيزه العالي في الخرسانة والتلامس المباشر بين حبيباته. بالإضافة إلى ذلك قوة التماسك بين المونة والركام يعتبر أيضاً عاملاً ذو أهمية لإنتاج خرسانة قوية والتي تعتمد على تدرج وشكل وملمس الركام الخشن [1].

حبيبات الركام ذو الشكل المدور أو الزاوي تفضل عن الحبيبات المفلطحة والعصوية وذلك لأن استخدام الركام المفلطح والعصوي يمكن أن يسبب في إنتاج قنوات ضيقة تمنع تدفق المونة مما يؤدي إلى ظهور تعشيش ومناطق ضعيفة في الخرسانة. وقد وجد أنه بخلط حبيبات الركام المهشم مع حبيبات الركام المدور يمكن الحصول على هيكل ركامي مع محتوى فراغات منخفض ونقاط تلامس عالية مما يؤدي إلى خفض من استهلاك المونة وبالتالي التقليل من التكلفة. توفر حبيبات الركام ذات المللمس الخشن سطح أفضل للالتصاق بالمونة مما يعزز من التماسك بين المونة والركام [3].

جدول 1: حدود التدرج الحبيبي للركام الخشن في تقنية الخرسانة ذات المرحلتين.

المرجع	نسبة المار (%)			مقاس فتحة المنخل (مم)
	التدرج (3)	التدرج (2)	التدرج (1)	
[4,2]	0.5	-	100-95	37.5
	-	-	80-40	25.0
	-	10-00	40-25	19.0
	-	02-00	10-00	12.5
	-	01-00	20-00	9.5
[5]	-	-	100	150.0
	-	100	67	75.0
	97	62	40	37.5
	09	04	06	19.0
	01	01	01	12.5

بصفة عامة، عند تحديد تدرج الركام الخشن يكون المعيار الأهم هو التقليل من محتوى الفراغات لأنه كلما كان محتوى الفراغات في الركام الخشن صغير كلما قلت كمية المونة اللازمة لمليء هذه الفراغات. الاختيار الجيد يؤدي ليس فقط إلى توفير اقتصادياً إنما أيضاً التقليل من ارتفاع درجة الحرارة نتيجة لانخفاض في محتوى المواد الإسمنتية. ويمكن تحقيق الحد الأدنى من

جدول 2: حدود التدرج الموصي بها للركام الناعم في الخرسانة ذات المرحتين.

المرجع	نسبة المار (%)		مقاس فتحة المنخل	
	التدرج (2)	التدرج (1)	ASTM #	مم
[4,2]	100	-	4 #	4.75
	100-90	100	8 #	2.36
	90-80	100-95	16 #	1.18
	70-55	80-55	30 #	0.60
	50-25	55-30	50 #	0.30
	30-05	30-10	100 #	0.15
	10-00	10-00	200 #	0.075
	2.45-1.6	2.1-1.3	معامل النعومة	
[5]		100	8 #	2.36
		98	16 #	1.18
		72	30 #	0.60
		34	50 #	0.30
		11	100 #	0.15
[8]		100	8 #	2.36
		100-95	16 #	1.18
		75-55	30 #	0.60
		45-25	50 #	0.30
		20-05	100 #	0.15
		05-00	200 #	0.075
		2.1-1.65	معامل النعومة	
[8]		100	8 #	2.36
		90	16 #	1.18
		80-60	30 #	0.60
		50-20	50 #	0.30
		20-10	100 #	0.15
		2.2-1.6	معامل النعومة	

محتوى الفراغات عندما يكون تدرج الركام الخشن المستخدم منتظم من أصغر مقاس مسموح به إلى أكبر مقاس حيث أن أكبر مقاس مسموح به يكون في العادة 40 مم أو أكثر. في المقاطع العادية أو المسلحة سيحدد المقاس بناءً على سمك المقطع المراد صبه والمسافة بين قضبان التسليح حيث يجب ألا يتجاوز الحد الأقصى لحبيبات الركام الخشن ثلث البعد الأصغر في المقطع. أما في حالة الخرسانة الكتلية فلا توجد هناك قيود محددة بشأن الحد الأقصى لحبيبات الركام الخشن المستخدم [3]. صغر مقاس لحبيبات الركام الخشن يجب أن يكون على الأقل أربع أضعاف من أكبر مقاس في حبيبات الركام الناعم المستخدمة وذلك من أجل تحسين قابلية المونة على التغلغل خلال هيكل الركام الخشن مسبق الوضع. كما يفضل عدم استخدام الركام ذو المقاس الأصغر من 20 مم لأنه

يسبب في سد أنابيب الحقن والفجوات الذي يؤدي إلى إعاقة تدفق المونة [6]. الركام الناعم يلعب دوراً هاماً في تصميم الانسيابية لمزيج المونة والسيطرة على قابليتها للتدفق [1]. يكون المقاس الأقصى للركام الناعم المستخدم في إنتاج مونة الخرسانة ذات المرحتين أصغر من 2.4 مم [7]. وذلك لأنه عند استخدام رمل ذي حبيبات خشنة وكبيرة (مقاس الحبيبات < 3 مم) تكون هناك خطورة أكبر لحدوث انفصال في مكونات المونة مقارنةً باستخدام الرمل الناعم [1]. ويوصى بأن يكون معامل النعومة للركام الناعم المستخدم يتراوح ما بين 1.2-2 [3].

المواد الإسمنتية

الإسمنت البورتلاندي العادي هو المادة الإسمنتية التي يشيع استخدامها في مونة الخرسانة ذات المرحتين. كما أنه يمكن استخدام أي نوع من أنواع الإسمنت بدون هواء محبوس والذي يتوافق مع المتطلبات. إن استخدام أسمنت ذي الهواء المحبوس يمكن أن يؤدي إلى انخفاض المقاومة نتيجة وجود كميات كبيرة من الهواء المحبوس في المونة. وفي الحالات الخاصة التي تحتاج إلى وجود هواء محبوس في الخرسانة يتم استخدام إضافات تساعد في حبس الهواء [1]. كما يمكن استخدام المواد الإسمنتية التكميلية بما في ذلك خبث الأفران وغبار السيليكا والرماد المتطاير. حيث إن هذه المواد توفر العديد من الفوائد للخرسانة ذات المرحتين مثل التقليل من النفاذية وتحسين خواصها الميكانيكية والتحملية [3].

الماء

كما في الخرسانة التقليدية ماء الخلط المستخدم في إعداد مونة الخرسانة ذاتية الدمك يجب أن يكون نظيفاً وخالي من الملوثات الكيميائية والعضوية التي قد تؤثر سلباً على خواص الخرسانة المنتجة.

الإضافات

الإضافات عادة ما تستخدم في المونة لمعالجة والتقليل من تأثير النضح والتقليل من نسبة الماء إلى الأسمنت (w/c ratio) للوصول إلى السيولة المطلوبة وللتأخير أو التعجيل من زمن الشك ولتوفير التمدد خلال الحالة اللدنة للمونة [1]. تكون الجرعة الموصى بها عادة لإضافات تحسين السيولة للمونة 1% من وزن المواد الإسمنتية [2]، ومن الإضافات المستخدمة على نطاق واسع في تحسين خواص الخرسانة سواءً التقليدية أو ذات المرحتين، المددات الفائقة وإضافة تعديل اللزوجة.

خصائص المونة الاسمنتية

تتأثر خصائص الخرسانة ذات المرحتين أيضاً بخصائص المونة المستخدمة وكفاءة عملية الحقن. الخصائص المهمة التي يجب توفرها في المونة للحصول على خرسانة ذات جودة عالية يمكن حصرهم في السيولة العالية واللزوجة الجيدة ومقاومة الانفصال وانخفاض الترسيب. تتأثر هذه الخصائص بعدة عوامل منها محتوى الماء والأسمنت والرمل وتدرجه بالإضافة إلى نوع وكمية الإضافات المستخدمة [1].

مميزات تقنية الخرسانة ذات المرحتين

الخرسانة ذات المرحتين تختلف عن الخرسانة التقليدية في عدة جوانب أهمها:

طريقة الخلط والصب

جميع مكونات الخرسانة التقليدية (أسمنت وركام وماء) يتم خلطها مع بعضها البعض مجتمعة ومن ثم صبها في قوالب العمل. أما في الخرسانة ذات المرحتين فإن عملية الخلط والصب تتم على مرحلتين، في المرحلة الأولى يتم وضع الركام الخشن في قوالب العمل وفي المرحلة الثانية يتم حقن الفراغات بين حبيبات الركام بمونة خاصة بواسطة أنابيب ضخ تمتد إلى قاع القالب لتملئ هذه الفراغات بالكامل [3].

محتوى الركام الخشن

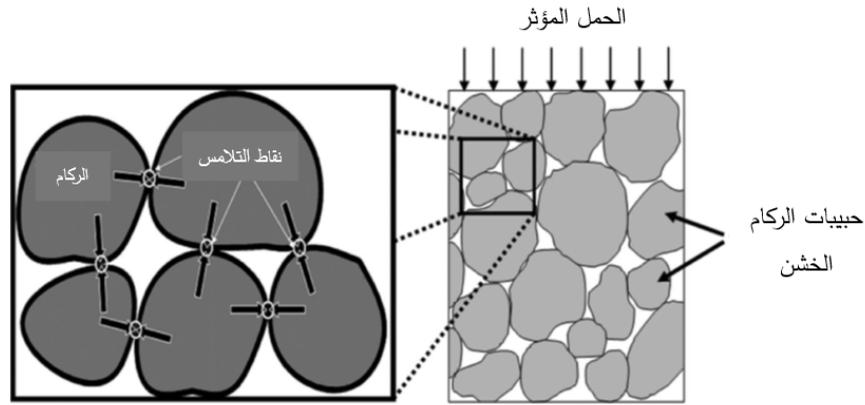
تقنية الخرسانة ذات المرحتين تحتوي على نسبة أعلى من الركام الخشن وبالتالي فإن خصائص الركام سيكون له التأثير الأكبر على خصائص الخرسانة من المونة الإسمنتية. عليه فإنه يمكن اعتبار الخرسانة ذات المرحتين على أنها هيكل من حبيبات الركام الخشن المستندة على بعضها البعض تاركة فجوات داخلية صغيرة ليتم ملئها بالمونة الإسمنتية. على النقيض في الخرسانة التقليدية التي تحتوي على كمية أكبر من المونة الإسمنتية ويكون بها الركام نوعاً ما في حالة متفرقة [3].

توزيع الإجهادات

بسبب التلامس المباشر الموجود بين حبيبات الركام الخشن فإن الإجهادات المؤثرة على الخرسانة ذات المرحتين تنتقل أولاً في حبيبات الركام الخشن مسبق الوضع ومن ثم في المونة المتصلة كما هو موضح في شكل (3)، نتيجة لذلك وجد أن الانكماش في الخرسانة ذات المرحتين يقل بحوالي النصف بالمقارنة مع الخرسانة التقليدية [6].

معامل المرونة

وجد أن معامل المرونة في الخرسانة ذات المرحتين يكون أعلى من ذلك في الخرسانة التقليدية بحوالي 30% [1]. يرجع ذلك إلى الهيكل الركامي للخرسانة ذات المرحتين الذي يكون فيه الركام الخشن مستند على بعضه البعض، بالإضافة إلى ارتفاع معامل المرونة للركام الخشن مقارنة مع المونة الاسمنتية.



شكل 3: آلية نقل الإجهادات في الخرسانة ذات المرحتين [3].

التماسك

واحدة من الخصائص الاستثنائية للخرسانة ذات المرحتين هي قدرتها العالية على التماسك والترابط مع الخرسانة القائمة عند استخدامها في أعمال الترميم. وذلك يرجع إلى الانكماش الجفافي المنخفض للخرسانة ذات المرحتين الذي يقلل من الإجهادات المتولدة [7].

الانفصال

من مزايا الخرسانة ذات المرحتين تغلبها على مشكلة الانفصال الحبيبي للركام خاصة في الخرسانات ثقيلة الوزن وذلك نتيجة للوضع المسبق للركام الخشن في قوالب العمل مما يوفر الحالة المنفصلة بين الركام الخشن والناعم. وهذا يؤدي بدوره إلى إنتاج خرسانة كثيفة وغير مسامية وذات خواص أكثر تجانساً. علاوة على ذلك لا يستعمل لهذا النوع من الصب الهزازات وهذا من شأنه أن يساعد في التقليل من تكلفة إنتاج الخرسانة [6,3].

حرارة التميؤ

تظهر ميزة أخرى لتقنية الخرسانة ذات المرحتين وهي القدرة في السيطرة على حرارة التميؤ من خلال تبريد الركام الخشن مسبق الوضع في القوالب ومن ثم حقن المونة المبردة [7,2].

الزحف

أظهرت اختبارات الزحف للخرسانة ذات المرحتين بعد ثلاثة أشهر قيم زحف أقل بكثير من تلك في الخرسانة التقليدية. يرجع ذلك إلى الاستقرار الحجمي لها بالمقارنة مع الخرسانة التقليدية، بسبب احتوائها على كمية أكبر من الركام الخشن وكمية أقل من العجينة الإسمنتية المسؤولة بالدرجة الأولى عن الزحف [3].

التحميلية

من المحتوى العالي للركام الخشن في الخرسانة ذات المرحتين والتلامس المباشر بين حبيباته نتيجة للوضع المسبق له في قالب العمل، وانخفاض محتوى المونة الاسمنتية في الخرسانة. فإن هذا يقلل من مسامية الخرسانة ومن إمكانية تغلغل المواد الضارة والمداهمات الكيميائية إلى الخرسانة والذي بدوره يحسن من التحملية.

أماكن استخدام الخرسانة ذات المرحتين

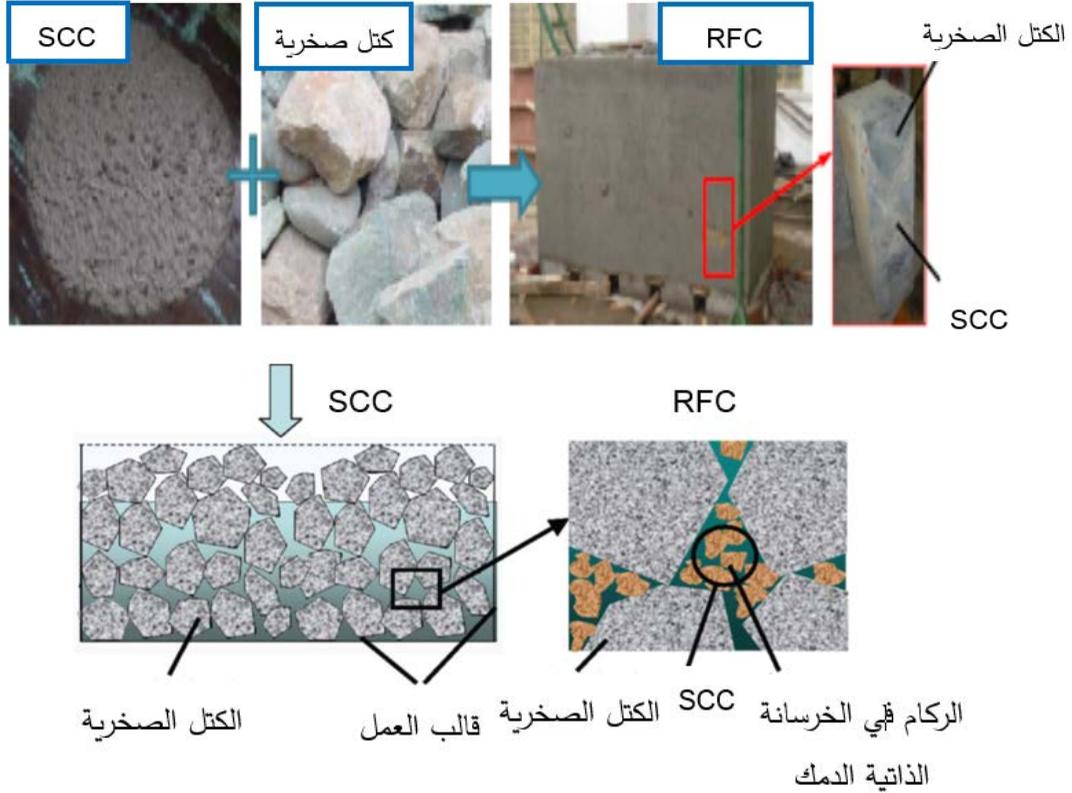
أهم أماكن تطبيق الخرسانة ذات المرحتين لتجاوز القصور الذي قد ينتج من استخدام الخرسانة التقليدية فنياً واقتصادياً [1،9]:

- الأماكن التي يصعب فيها الصب بالطريقة التقليدية مثلاً في حالة وجود كثافة تسليح.
- عندما يكون التغير الحجمي المنخفض لخرسانة الترميم مطلوباً وذلك لتجنب الشقوق الناتجة عن إجهادات الشد بسبب الانكماش الجفافي والتقييد الناجم من الخرسانة القائمة.
- عند الصب تحت الماء مع وجود صعوبة في إزاحة الماء وارتفاع تكاليف الصب بالطريقة التقليدية.
- في بعض عمليات الترميم وإضافات للمنشآت الخرسانية.
- الخرسانة التي يستخدم فيها ركام ثقيل الوزن (مثل خرسانة المفاعلات النووية).
- الأساسات كبيرة الحجم التي لها اعتبارات فنية خاصة، مثل المخاوف من التصدعات الحرارية والانكماش والفواصل الباردة.
- تشييد المنشآت الساندة للماء (السدود) وذلك لانخفاض نفاذيتها.

خرسانة "الصخور المملوءة بالخرسانة"

خرسانة "الصخور المملوءة بالخرسانة" هي عبارة عن خليط من الصخر والخرسانة الذاتية الدمك (SCC). يتم إنتاجها عن طريق ضخ أو صب خرسانة ذاتية الدمك جاهزة الخلط في الفراغات

بين كتل صخرية ذات مقاس أدنى 300 مم لمليء هذه الفراغات تبعاً لسيولتها الجيدة ومقاومتها للانفصال كما في شكل (4) [11,10].



شكل 4: آلية تنفيذ تقنية خرسانة "الصخور المملوءة بالخرسانة" [1]

نسبة الخرسانة الذاتية الدمك تكون حوالي 40-45% من إجمالي حجم خرسانة "الصخور المملوءة بالخرسانة". يساعد ذلك كثيراً في التقليل من محتوى الأسمنت والذي يؤدي بدوره إلى الخفض من التكلفة والحرارة الناتجة عن عملية التميؤ كما يحسن إلى حد كبير من كفاءة المنشأ. بالإضافة إلى ذلك فإن تقنية خرسانة "الصخور المملوءة بالخرسانة" تبسط من عملية إدارة المنشآت وتسهل من مراقبة الجودة والتحكم في درجة الحرارة [11]. وبذلك توفر هذه التقنية العديد من المزايا التي تتعلق بالجودة والتكلفة والاعتبارات البيئية [6].

في تقنية خرسانة "الصخور المملوءة بالخرسانة" يمكن استخدام الحجارة المرصوفة أو الأنقاض بمقاس يتراوح من 300 مم إلى 1,500 مم كقطع صخور في إنتاجها. أما الركام ذو المقاس الأقصى 20 مم يوصى باستخدامه في إنتاج الخرسانة الذاتية الدمك بقيمة هبوط (قطر الانتشار) 650 مم (±50) [10]. استخدمت تقنية خرسانة "الصخور المملوءة بالخرسانة" لأول مرة في تشييد السودان عام 2005 م، ومنذ ذلك الحين تسارع التطبيق العملي لها. ومن أهم هذه التطبيقات، بناء سد

مساعد وردم المجرى في مشروع خزان الضخ (Baoquan) بالصين، وفي مشروع ترميم الخزان الثالث بـ (Changkeng) جنوب الصين. كذلك استخدمت في ردم القيسون (Caisson) في مشروع محطة الطاقة الكهرومائية بـ (Xiangjiaba)، الصين.

تقنيات تنفيذ خرسانة "الصخور المملوءة بالخرسانة"

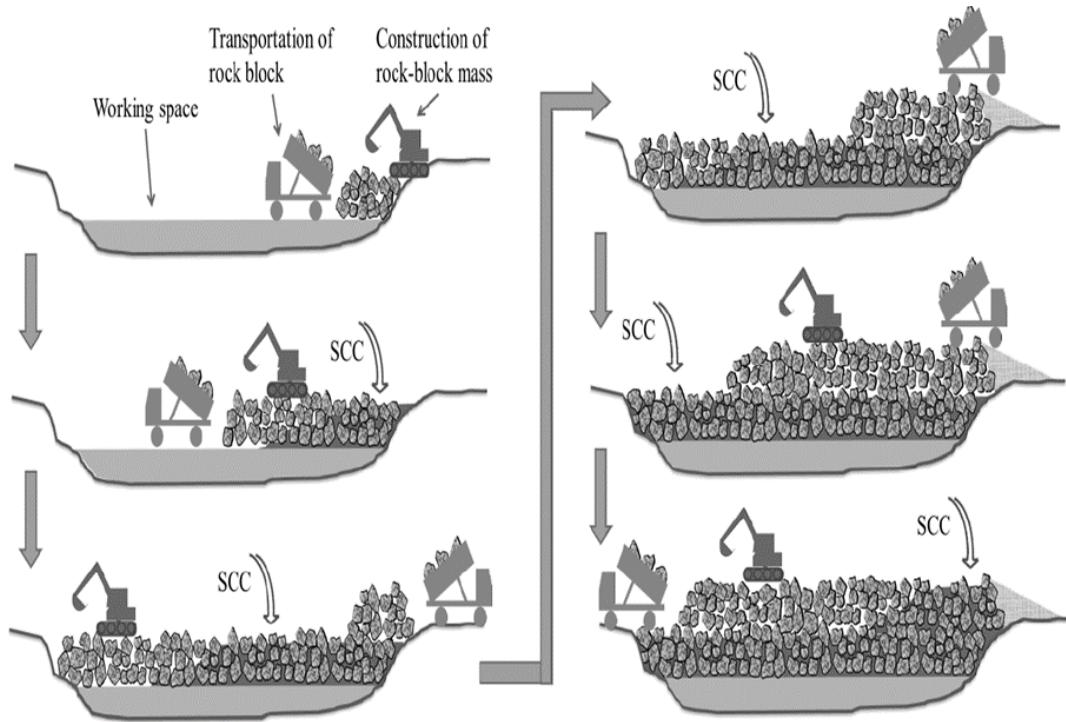
تم تطوير وتطبيق نوعين من تقنية خرسانة "الصخور المملوءة بالخرسانة" في عدة مشاريع للهندسة الهيدروليكية في الصين. طبقت هذه التقنية بنجاح في أكثر من 40 مشروع مستخدمين أكثر من 500,000 متر مكعب من خرسانة "الصخور المملوءة بالخرسانة" في تشييدهم. طريقي تنفيذ تقنية خرسانة "الصخور المملوءة بالخرسانة" واللتين عرفتا بناءً على آلية وأسلوب تنفيذهما هما: الطريقة التقليدية (Traditional Type) وطريقة الإسقاط (Dump Type) كما هو موضح في شكل (5) وشكل (6) على التوالي [11,10].

الطريقة التقليدية

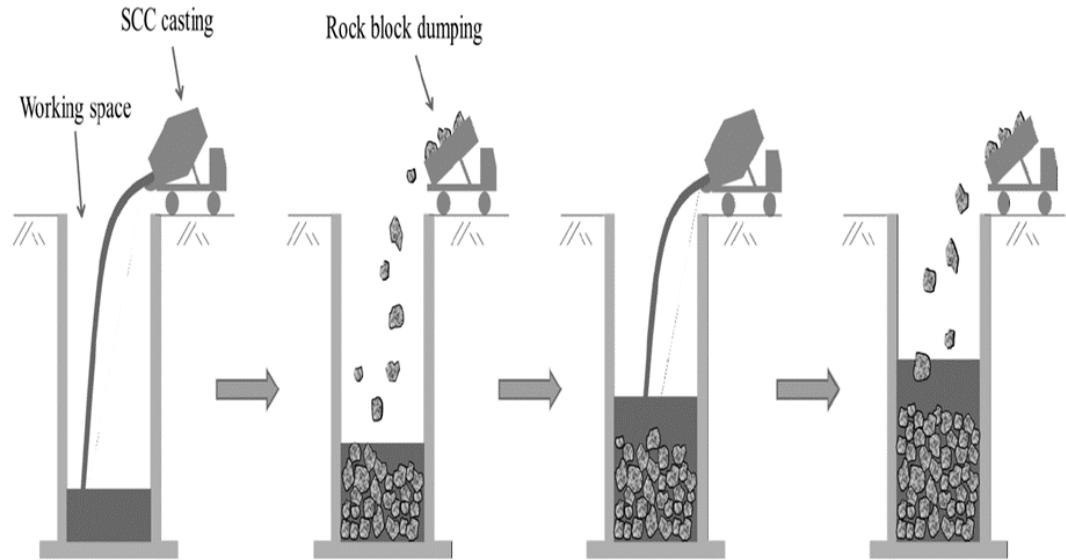
تعرف هذه الطريقة أيضاً بالنوع العام (General Type). في هذه الطريقة من تقنية تنفيذ خرسانة "الصخور المملوءة بالخرسانة" يتم تعبئة مساحة العمل أولاً بقطع الصخور لتشكيل تكوين صخري موحد. يلي ذلك ضخ أو صب الخرسانة الذاتية الدمك على سطح الصخور مباشرةً بحيث تتساق إلى أسفل تحت تأثير وزنها لتملأ الفراغات بين الكتل الصخرية الموضوعة كما هو موضح في شكل (5). جميع هذه العمليات يجب القيام بها في آن واحد، بحيث بعد الانتهاء من تنفيذ الطبقة الأولى لخرسانة "الصخور المملوءة بالخرسانة" يتم القيام بالطبقة التالية مباشرةً، وكنتيجه لذلك يمكن تحقيق نشاط بناء سريع عن طريق الصب المستمر. وعموماً يجب ألا يزيد سمك الطبقة الواحدة المنفذة للخرسانة عن 1.5 متر وذلك لضمان جودة البناء، كما يفضل هذا النوع في تنفيذ المشاريع ذات مساحات العمل الكبيرة كتشييد السدود [11,10].

طريقة الإسقاط

في هذه الطريقة من تقنية تنفيذ خرسانة "الصخور المملوءة بالخرسانة" يتم أولاً صب الخرسانة الذاتية الدمك في مساحة العمل، ومن ثم تفريغ كتل الصخور فيها. مزايا هذا النوع من التقنية يمكن استغلالها بالكامل في المشاريع ذات مساحات العمل الصغيرة مع وجود انخفاض كبير في الارتفاع [11,10]، كما هو موضح في شكل (6).



شكل 5: مراحل تنفيذ خرسانة "الصخور المملوءة بالخرسانة" بالطريقة التقليدية [11].



شكل 6: مراحل تنفيذ خرسانة "الصخور المملوءة بالخرسانة" بطريقة الإسقاط [11].

مميزات خرسانة "الصخور المملوءة بالخرسانة"

- انخفاض الحرارة الناتجة عن عملية التميؤ، نتيجة لاستخدام محتوى أسمنتي منخفض مما يجعل التحكم في درجة الحرارة أكثر سهولة.

- يساعد في تبسيط التنفيذ والتسريع من تشييد المشاريع الخرسانية الضخمة عن طريق السماح بالصب المستمر للخرسانة الذاتية الدمك.
- عدم الحاجة للدمك بسبب استخدام الخرسانة الذاتية الدمك.
- تبسيط عملية إنتاج الركام وآلات خلط الخرسانة يساهم في خفض التكلفة.
- استقرار حجمي لها نتيجة لاستخدام كتل الصخور كهيكل للخرسانة مما يؤدي إلى التقليل من الانكماش الجفافي وبالتالي تجنب الشقوق الناتجة عن الانكماش.
- الحد من الضوضاء واستهلاك الطاقة يساهم في خفض انبعاث الملوثات مما يؤدي إلى تحسين الأداء البيئي.
- كثافة عالية ومقاومة ضغط جيدة.

الدراسات المعملية الخاصة بتقنية الخرسانة ذات المرحتين وتقنية خرسانة "الصخور المملوءة بالخرسانة"

خلال السنوات الماضية أجريت العديد من الدراسات النظرية والمعملية للتعرف على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للتقنيتين (TSC، RFC) تناولت هذه الدراسات عدة مواضيع وجدول (3) وجدول (4) يلخصان أهم النتائج المستنتجة من هذه التجارب.

جدول 3: ملخص لأهم نتائج الدراسات المعملية الخاصة بالخرسانة ذات المرحتين [12-17].

النتائج	المتغيرات	الخاصية
وجد أن نسبة الترسيب في المونة الإسمنتية تزداد بزيادة نسبة الـ w/c	نسبة الـ w/c	نسبة الترسيب في المونة الإسمنتية
وجد أن نسبة الترسيب في المونة الإسمنتية تقل بزيادة زمن الخلط	*زمن الخلط	
وجد أن نسبة الترسيب في المونة الإسمنتية تقل بزيادة الركام الناعم	الركام الناعم	
الزمن المستغرق في خلط المونة الاسمنتية		*زمن الخلط
وجد أن سيولة المونة وقابليتها للتدفق تقل بزيادة زمن الخلط	زمن الخلط	سيولة المونة الإسمنتية
وجد أن مقاومة الضغط تزداد بزيادة زمن الخلط بسبب انخفاض الترسيب وزيادة المساحة السطحية للأسمنت	زمن الخلط	مقاومة ضغط المونة
لوحظ أن مقاومة الضغط لـ TSC بعد 7 أيام في الخلطات ذات نسبة w/c منخفضة مع استخدام المدونات الفائقة كانت أعلى من الخلطات ذات نسب w/c أعلى	نسبة الـ w/c	مقاومة الضغط لـ TSC
وجد أن مقاومة الضغط لـ TSC تقل بزيادة نسبة الـ w/c		

وجد أيضا أن مقاومة الضغط للخرسانة المنتجة بتقنية الـ TSC كانت أعلى بالمقارنة مع الخرسانة التقليدية	آلية الإنتاج		
وجد أن مقاومة الضغط للخرسانة تقل عند استبدال نسبة من الركام الخشن والناعم الطبيعي بركام معاد التدوير	نوع الركام (الخشن والناعم)		
وجد أن مقاومة الضغط للخرسانة المنتجة بالطريقة التقليدية وبطريقة الركام مسبق الوضع المصبوبة تحت الماء كانت أقل من الخرسانة المصبوبة في الهواء ويمكن أن يرجع ذلك إلى انجراف المونة الإسمنتية	مكان الصب		
وجد أن مقاومة الضغط لـ TSC عند عدم استخدام أي إضافات كانت أقل من نظيرتها في الخرسانة التقليدية	الإضافات		
وجد كذلك أن مقاومة الضغط لـ TSC عند استخدام الملدنات الفائقة كانت أقل بقليل من نظيرتها في الخرسانة التقليدية			
وعلى النقيض وجد أن مقاومة الضغط لـ TSC تكون أعلى بكثير من نظيرتها في الخرسانة التقليدية عند استخدام الإضافات المساعدة على التمدد			
وجد أن مقاومة الشد تتخفض بزيادة نسبة الـ w/c	نسبة الـ w/c	مقاومة الشد لـ TSC	
وجد أن مقاومة الشد للخرسانة المنتجة بتقنية ذات المرحلتين كانت أقل من نظيرتها الخرسانة المنتجة بالطريقة التقليدية	آلية الإنتاج		
وجد أن مقاومة الشد للخرسانة المنتجة بتقنية ذات المرحلتين كانت أعلى من نظيرتها في الخرسانة المنتجة بالطريقة التقليدية عند استخدام الملدنات الفائقة والإضافات المساعدة على التمدد			
وجد أن مقاومة الانحناء للخرسانة ذات المرحلتين تقل بزيادة نسبة الـ w/c	نسبة الـ w/c	مقاومة الانحناء لـ TSC	
وجد أن مقاومة الانحناء للخرسانة ذات المرحلتين أعلى من الخرسانة التقليدية لجميع نسب الخلط	نسب خلط (ركام خشن: ركام ناعم: أسمنت)		
وجد أن مقاومة الانحناء للخرسانة ذات المرحلتين والخرسانة التقليدية تزداد بزيادة مقاس الركام الخشن إلا أن معدل الزيادة في الخرسانة التقليدية يكون أكبر بالمقارنة مع الخرسانة ذات المرحلتين	مقاس الركام الخشن		
يكون الانكماش في الخرسانة ذات المرحلتين أقل من ذلك في الخرسانة التقليدية	-	الانكماش في الـ TSC	

جدول 4: ملخص لأهم نتائج الدراسات المعملية الخاصة بخرسانة "الصخور المملوءة بالخرسانة" [18-19].

الخاصية	المتغيرات	النتائج
إجمالي الأثر البيئي لـ RFC	-	تظهر الدراسات أن استخدام تقنية خرسانة "الصخور المملوءة بالخرسانة" يمكن أن تقلل من استهلاك الطاقة وانبعثات ثاني أكسيد الكربون بنسبة 38% و 33% على التوالي بالمقارنة مع الخرسانة التقليدية
مقاومة الضغط لـ RFC	-	وجد أن متوسط مقاومة الضغط لخرسانة "الصخور المملوءة بالخرسانة" تبلغ حوالي 1.27 من متوسط مقاومة الضغط للخرسانة الذاتية الدمك

الخلاصة والتوصيات

بسبب القصور والقيود المفروضة على استخدام الخرسانة التقليدية تم تطوير أنواع جديدة من الخرسانات في سبيل الوصول إلى خرسانة ذات جودة عالية وبأقل التكاليف تلبي متطلبات البناء من جميع النواحي البيئية والاقتصادية والميكانيكية. ومن ضمن هذه التقنيات الحديثة هما الخرسانة ذات المرحلتين وخرسانة "الصخور المملوءة بالخرسانة". تختلف هذه التقنيات عن الخرسانة التقليدية من حيث آلية الخلط والتنفيذ وهذا الاختلاف ينتج عنه تأثير كبير على خصائص الخرسانة المنتجة من الناحيتين الميكانيكية والاقتصادية.

من خلال الدراسات المعملية وجد أنه ليس هناك فروقات بين هذه التقنيات والخرسانة التقليدية في كثير من الخصائص الميكانيكية مثل مقاومة الضغط ومقاومة الشد ومقاومة الانحناء حيث تباينت النتائج المتحصل عليها من الدراسات المعملية المختلفة، إلا أن هذه التقنيات تفوقت على الخرسانة التقليدية في عدة خصائص أخرى كالتقليل من التعشيش والانكماش في الخرسانة وارتفاع معامل المرونة بالمقارنة مع الخرسانة التقليدية بالإضافة إلى تفوقها من الناحيتين البيئية والاقتصادية والتسريع من عمليات التشييد. وبالرغم من ذلك فإنه يوجد بعض القيود على استخدامات هذه التقنيتين، حيث أن الخرسانة ذات المرحلتين عادة ما تستخدم في بعض أعمال الترميم وفي صب الخرسانة تحت الماء وعند وجود كثافة في حديد التسليح بالإضافة إلى أنها مفيدة بشكل خاص في حالة الخرسانات ذات الركام ثقيل الوزن. أما تقنية خرسانة "الصخور المملوءة بالخرسانة" فنظراً لطبيعة حجم الصخور الداخلة في إنتاجها والتي يكون المقاس الأدنى لها 300 مم فقد اقتصر استخدامها على المنشآت الضخمة كالسدود.

تقنيتي الخرسانة ذات المرحتين وخرسانة "الصخور المملوءة بالخرسانة" بالرغم من أن اكتشافها وبداية استخدامها كان منذ فترة إلا أن استخدامها وتطبيقها في تشييد المنشآت على نطاق واسع ظل محدوداً ونادراً. عليه يمكن اعتبارها من التقنيات الواعدة في الخرسانة التي تحتاج إلى المزيد من الدراسات والبحث لفتح المجال أمام استخدامها في المزيد من التطبيقات الخرسانية المستقبلية، كما أنها من ضمن التقنيات التي نوصي بتبنيها واستغلالها في ليبيا من الناحيتين الأكاديمية والتنفيذية، للتعرف على أدائها ومميزاتها من النواحي الاقتصادية والميكانيكية والبيئية، والاستفادة من هذه التقنيات بالإضافة إلى الركام المعاد التدوير الناتج عن مخلفات المباني في تنفيذ المشاريع الكبرى وإعادة الإعمار في ليبيا.

المراجع

- [1] Abdelgader, H. S., Khatib, J., M. & El-baden, A. S., "Self-Compacting Grout to Produce Two-Stage Concrete", 2nd International Sustainable Buildings Symposium (ISBS 2015), 28-30 May 2015, Gazi University, Ankara, Turkey, pp30-36.
<http://www.isbs2015.gazi.edu.tr> ISBN: 978-975-507-278-4
- [2] ACI 304.1. "Guide for the Use of Preplaced Aggregate Concrete for Structural and Mass Concrete Applications", ACI Committee 304.1, 2005.
- [3] Najjar, M., Soliman, A. & Nehdi, M., "Critical Overview of Two-stage Concrete: Properties and Applications", Construction and Building Materials, V. 62, 2014, pp. 47-58.
- [4] ACI 304. "Guide for Measuring, Mixing, Transporting, and Placing Concrete", American Concrete Institute, ACI Committee 304, 2005.
- [5] Neville, A. & Brooks, J., "Concrete Technology", 2nd ed., UK: Longman Group, 2010.
- [6] Abdelgader H. & Najjar M., "Advances in Concreting Methods", 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, Algeria, 2009. pp. 315–324.
- [7] Bayer, R., "Use of Preplaced Aggregate Concrete for Mass Concrete Applications", Master of Science in Civil Engineering Thesis, Middle East Technical University, 2004.
- [8] Davis, R. & Haltenhoff, C., "Mackinac Bridge Pier Construction", ACI Journal, Proceedings V. 53, No. 6, 1956.
- [9] REMR TECHNICAL NOTE CS-MR-9.4, "Specialized Repair Technique: Preplaced-Aggregate Concrete, Suppl 5, 1992, pp. 1-3.
- [10] Huang, M., An, X., Ouchi, M., Zhou, H. & Jin, F., "Application of SCC in Massive Concrete", 4th International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications, High-Performance Concrete, 2009, pp. 552-557.
- [11] Huang, M., Jin, F., An, X., Zhou, H. & Wu, Q., "Rock-Filled Concrete, a New Normal of SCC in Hydraulic Engineering in China", 5th North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, Chicago, U.S.A., 2013.

- [12] Abdelgader H., "How to Design Concrete Produced by a Two-stage Concreting Method", *Cement and Concrete Research*, V. 29, No. 3, 1999, pp.331–337.
- [13] Metawie, I., El Deeb, A., Hosny, A., Khalifa, M., Youssef, S., Assaad, M. & Abou-Zeid, M., "Properties of Preplaced Aggregate Concrete Cast in Air and Under Water", Paper Submitted for Presentation and Publication in the 92nd Annual Meeting of The Transportation Research Board, January 13-17, 2013, Washington, D. C.
- [14] Morohashi, N., Meyer, C. & Abdelgader, H., "Two-Stage Production Method: Concrete with Recycled Aggregates", *CPI-Concrete Plant International (Concrete Technology)*, V. 4, 2013, pp. 2-9.
<http://www.cpi-worldwide.com/en/journals/artikel/31050>
- [15] Abdul Awal, A., Mohammad, S. & Mazlan, D., "The Role of Expanding Admixture in The Development of Strength of Prepacked Concrete", HUSCAP, Malaysia, 2013.
- [16] Mtallib, M. & Marke, A., Comparative Evaluation of the Flexural Strength of Concrete and Colcrete, *Nigerian Journal of Technology*, V. 29 No.1, 2010.
- [17] Abdelgader, H. S., Górski, J., Khatib, J., M. & El-baden, A. S., "Two-stage concrete: effect of silica fume and superplasticizers on strength" *BFT INTERNATIONAL Concrete Plant + Precast Technology*, (Concrete Technology), 03/2016 pp30-36.
http://www.bft-international.com/en/issue/bft__2503759.html
- [18] Huang, M., Zhou, H., An, X. & Jin, F., "The Environmental Impact Assessment of Rock-Filled Concrete Technology in Dam Construction", *HYDROPOWER*, 2006, pp. 1188-1197.
- [19] Huang, M., An, X., Zhou, H. & Jin, F., "Rock-Filled Concrete-Development, Investigations and Applications", *International Water Power & Dam Construction*, 2008, pp. 38-48.